

Simulación y modelización de las escaleras mecánicas como vía para la mejora del confort de los pasajeros y la disminución de costes

J.D. Cano, J.M. Cabanellas, J.A. Chover y B. Suarez

La escalera mecánica lleva más de un siglo entre nosotros, sin apenas variar su diseño de forma notoria. La simulación mecánica de este sistema multicuerpo, asignatura pendiente en la actualidad, ahorrará tiempo y dinero frente a los experimentos tradicionales. En esta línea, CITEF está desarrollando una serie de herramientas de mejora del diseño basadas en modelos estáticos, cinemáticos y dinámicos para la simulación del comportamiento de la escalera mecánica convencional así como para el desarrollo y análisis de nuevos diseños. Estas herramientas permitirán el estudio de variables como son la velocidad y la aceleración del peldaño, así como los valores de tensión de la cadena y de reacción de los rodillos. Con los resultados obtenidos se podrán inferir mejoras que supongan una disminución del coste del conjunto de la escalera y del coste de mantenimiento, así como un aumento del confort del usuario.

Esta es una versión electrónica de un artículo publicado en las Actas del IV Congreso Nacional de Innovación Ferroviaria, Sevilla, España, 3-5 Diciembre, 2008.

Para citar este artículo, hacer referencia al artículo publicado:

J.D. Cano, J.M. Cabanellas, J.A. Chover y B. Suarez, Simulación y modelización de las escaleras mecánicas como vía para la mejora del confort de los pasajeros y la disminución de costes. Actas del IV Congreso Nacional de Innovación Ferroviaria, Sevilla, España, 3-5 Diciembre, 2008.

Simulación y modelización de las escaleras mecánicas como vía para la mejora del confort de los pasajeros y la disminución de costes

Juan David Cano, José María Cabanellas, José Antonio Chover, Berta Suárez

CITEF, Universidad Politécnica de Madrid

Resumen

La escalera mecánica lleva más de un siglo entre nosotros, sin apenas variar su diseño de forma notoria. La simulación mecánica de este sistema multicuerpo, asignatura pendiente en la actualidad, ahorrará tiempo y dinero frente a los experimentos tradicionales.

En esta línea, CITEF está desarrollando una serie herramientas de mejora del diseño basadas en modelos estáticos, cinemáticos y dinámicos para la simulación del comportamiento de la escalera mecánica convencional así como para el desarrollo y análisis de nuevos diseños.

Estas herramientas permitirán el estudio de variables como son la velocidad y la aceleración del peldaño, así como los valores de tensión de la cadena y de reacción de los rodillos. Con los resultados obtenidos se podrán inferir mejoras que supongan una disminución del coste del conjunto de la escalera y del coste de mantenimiento, así como un aumento del confort del usuario.

1. INTRODUCCIÓN

La muy escasa literatura sobre la dinámica y diseño de escaleras da una idea de la complejidad de este campo tan extendido y a la vez tan tradicional. La experiencia de CITEF en el desarrollo de modelos y su análisis en un amplio abanico de sistema ha permitido desarrollar las herramientas que a continuación presentamos.

La escalera mecánica se ha establecido como medio de transporte vertical por excelencia para las alturas medias desde 1.5 m hasta 75m. Este medio de transporte permite velocidades nominales de hasta 0.75 m/s, aunque en España suele establecerse en 0.5m/s. Gracias a la escalera mecánica se pueden desplazar un máximo de 13500 personas/hora de forma más cómoda para acceder a centros comerciales, museos, para salvar desniveles en ciudades con grandes pendientes, etc. Cada día miles de personas acceden al transporte suburbano empleando este medio de transporte, lo que crea la necesidad de un diseño robusto de este sistema para que sea seguro, confortable para el usuario y tenga el menor número de paradas posible, objetivo alcanzable si se dispone de componentes con un largo ciclo de vida y se minimiza el mantenimiento necesario.

Las escaleras mecánicas tienen más de un siglo de historia desde su concepción. A lo largo de los años, desde que Nathan Ames patentase la escalera triangular rotatoria en 1859, se han ido proponiendo multitud de ideas novedosas que, aunque muy pocas han sido llevadas a cabo, algunas sugieren líneas interesantes de investigación.

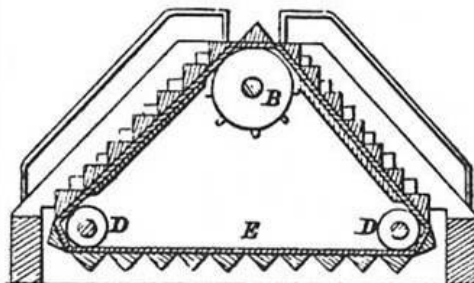


Figura 1 Escalera triangular de N. Ames (1859)

Si revisamos la literatura relacionada con el transporte vertical, sólo encontramos, aparte de los propios desarrollos de CITEF (1) y (2), un modelo de simulación de escalera mecánica realizado en DADs por la empresa LG. Este modelo, según describe el artículo (3), simula el comportamiento dinámico de una escalera convencional y ampliado al pasamanos en (4).

En publicaciones de carácter más general encontramos la descripción a un nivel más descriptivo el funcionamiento y las características de una escalera mecánica (5) y (6). Esta escasez de literatura técnica no es menoscabo para que este sector esté debidamente reglado y normado por sus implicaciones en la seguridad personal (7).

CITEF está apostando por la creación de modelos avanzados de simulación de escaleras mecánicas como vía para el análisis y mejora de la escalera mecánica actual. Mediante esta línea de investigación iniciada se pretende abaratar costes al disminuir los tiempos de prueba de nuevas ideas y al eliminar el empleo de prototipos reales una vez se haya validado el modelo. También se pretende obtener conclusiones sobre los resultados obtenidos que optimicen el diseño actual.

Las líneas seguidas en los diseños que aquí se presentan buscan la minimización del efecto de poligonalización que sufren las cadenas de rodillos, la obtención de una velocidad constante en la zona accesible por los pasajeros como medida de confort y la disminución del número de piezas mediante el empleo de un eslabón por peldaño en lugar de tres.

2. POLIGONALIZACIÓN

Como es conocido, el sistema de accionamiento de las escaleras mecánicas convencionales, está formado por sendas cadenas de rodillos accionadas habitualmente por ruedas dentadas que engranan con los rodillos de cada cadena en la cabecera superior. Estas ruedas, a su vez, son traccionadas por sistemas de engranajes o por correas.

El comportamiento dinámico de este sistema multicuerpo está gobernado por la dinámica de estas cadenas de rodillos. Estas cadenas aproximan la geometría de la guía a una poligonal, advirtiéndose diferencias con la geometría real en las zonas que no son rectas, sobre todo en las zonas de menor radio de curvatura como son las cabeceras de la escalera. Esta poligonalización de la geometría produce pequeñas fluctuaciones del diámetro eficaz haciendo que algunas variables como son la velocidad

lineal absoluta y la tensión de los eslabones oscilen y aumenten su amplitud. Este efecto se conoce como *efecto cadena* o *poligonalización*.

En la siguiente figura se puede observar el perfil de velocidades que presente una cadena de rodillos en la zona de volteo. Si el rodillo entra con una velocidad constante de 0.5m/s, no mantiene este valor al salir de la curva debido al efecto de poligonalización, que se transmitirá al resto de la cadena y, por tanto, también lo percibirán los usuarios de la misma.

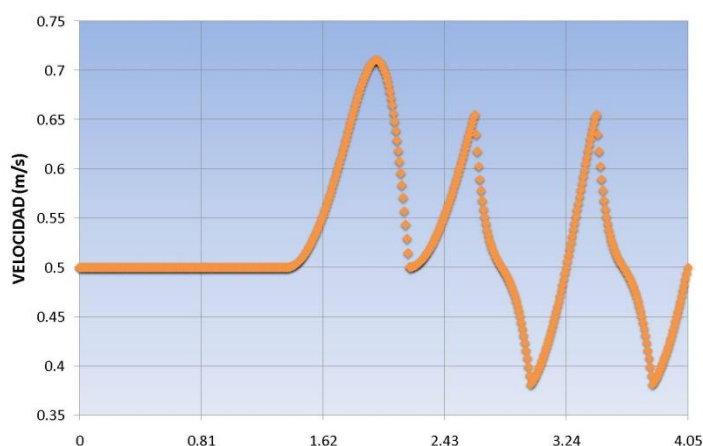


Figura 2 Perfil Cinemático de Velocidad en una zona de Volteo Circular

Este efecto es indeseable debido a que disminuye la vida de las cadenas, aumenta el coste de mantenimiento de las mismas y también disminuye el confort del pasajero, que percibe esas pequeñas variaciones de velocidad del peldaño. Existen diversas patentes que pretenden disminuir este efecto en las zonas de volteo principalmente. Si empleamos una de estas curvas *antipoligonalización* se obtiene el siguiente perfil cinemático de velocidad.

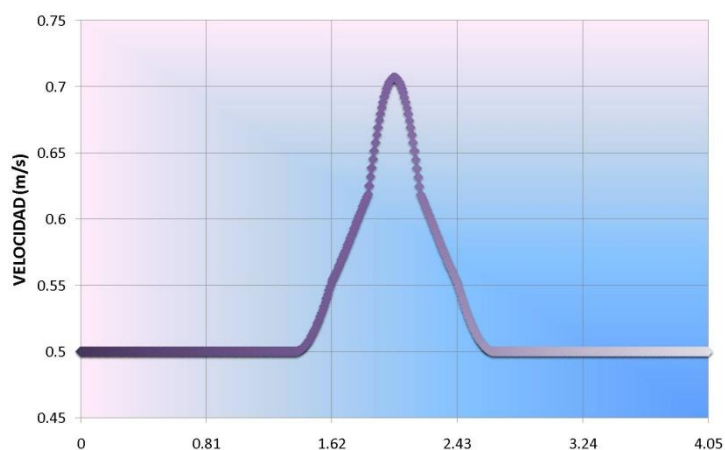


Figura 3 Perfil Cinemático de Velocidad en una zona de Volteo Antipoligonalización

Si comparamos la Figura 2 y la Figura 3, se puede concluir que la curva *antipoligonalización* presenta grandes ventajas respecto a la primera:

- Velocidad de salida igual a la velocidad de entrada
- Elimina la propagación del *efecto cadena* fuera de la zona curva

Estos resultados son válidos para el caso ideal en el que todos los sólidos son indeformables, hipótesis simplificativa que no es aceptable en todos los casos. Además en la escalera mecánica, como en todo mecanismo de cadenas, es necesario el empleo de un elemento tensor de cada cadena. El desplazamiento horizontal de estos tensores varía la geometría de la curva seguida por los rodillos en la zona inferior de volteo.

Se han realizado en SIMPACK varios modelos de cadena para analizar estos efectos. En primer lugar se creó un modelo de una escalera mecánica convencional empleando el módulo CHAIN para el diseño de la cadena. Este modelo se muestra en la Figura 4, dónde puede apreciarse la cadena que acciona el movimiento de los peldaños y las dos ruedas dentadas, la superior es la rueda tractora y la inferior es una rueda dirigida y elemento tensor de la cadena.

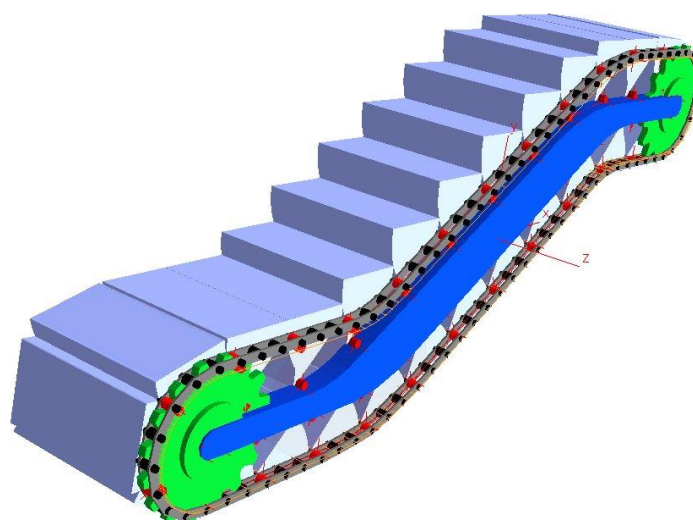


Figura 4 Modelo de Escalera Convencional realizado en SIMPACK

El contacto de los rodillos exteriores pertenecientes a la cadena y los interiores con sus guías correspondientes se ha definido como una fuerza con su rigidez y amortiguamiento entre dos marcadores móviles del tipo *parent/child*. En la siguiente figura se recoge la velocidad de un eslabón del modelo de escalera mecánica convencional representado en la Figura 4.

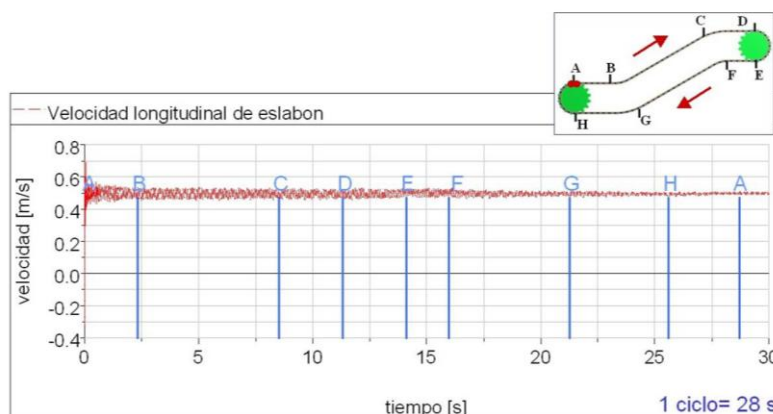


Figura 5 Velocidad Lineal de un Eslabón

Para el análisis de la influencia dinámica del tipo de curva empleada en las zonas no rectas se han realizado sendos modelos de cadena de rodillos para una escalera que salve una altura de 4.5 metros y tenga una inclinación de 30° sobre la horizontal. El sistema de tracción de este modelo es lineal a diferencia del modelo anterior, y se sitúa en la zona superior de la zona inclinada. Este sistema actúa sobre cada eslabón gracias a un sistema de control proporcional de velocidad para asegurar la velocidad tomada como referencia.

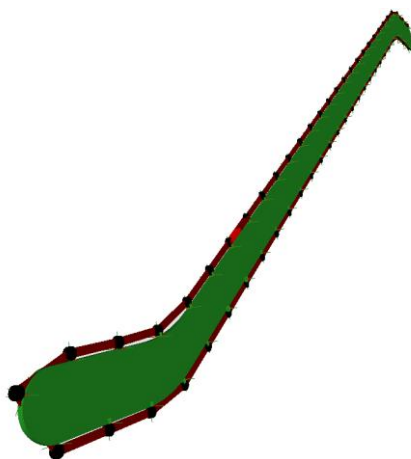


Figura 6 Modelo de Cadena de Rodillos de una Escalera Mecánica para una Altura de 4.5 metros

Como se ha dicho, se han creado dos modelos, uno con las zonas de transición y de volteo circulares y otros con todas estas zonas diseñadas como curvas *antipoligonalización*. La Figura 7 recoge uno de los *outputs* de este modelo, la velocidad lineal absoluta de uno de los rodillos. En esta se han superpuesto los perfiles de ambos modelos, viéndose claramente la propagación del efecto cadena en el modelo de guía con geometría circular. En el modelo con geometría de guía *antipoligonalización* se tienen pequeñas oscilaciones en la zona de retorno debidas al movimiento del tensor, pero con una amplitud despreciable frente al modelo de guía circular.

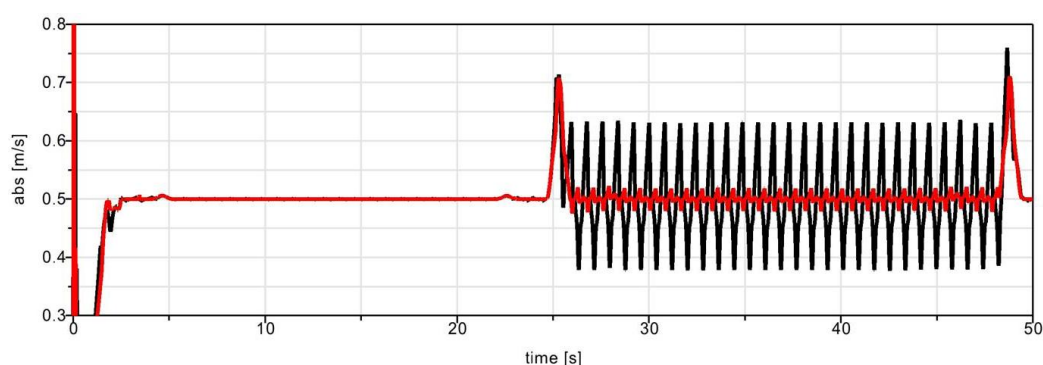


Figura 7 Perfiles de Velocidad para los Modelos de cadena con guía Circular (negro) y Antipoligonalización (rojo)

Este efecto se ve reflejado en otros *outputs* del modelo como lo es la tensión de la cadena, mientras que en la reacción casi no influye. En la siguiente figura se comprueba que la tensión de la guía circular oscila en torno a los valores de tensión de la guía *antipoligonalización*.

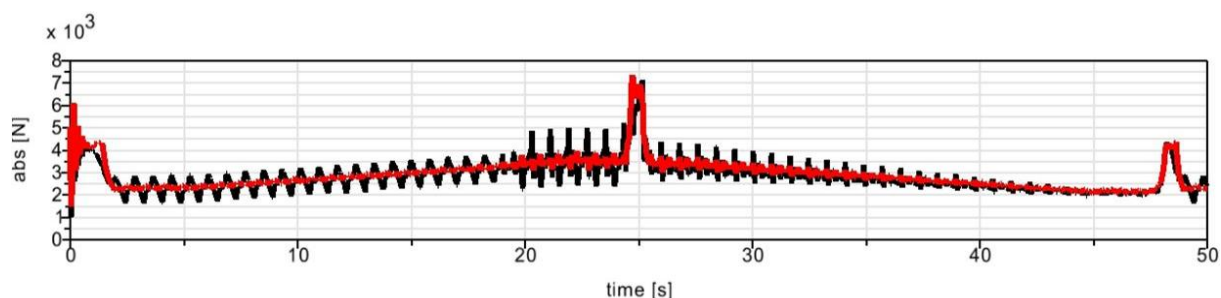


Figura 8 Tensión de un Eslabón de la Cadena de Rodillos para los Modelos de cadena con guía Circular (negro) y Antipoligonalización (rojo)

3. ANÁLISIS DE LA RELACIÓN CUERDA/ARCO

Las cadenas de la escalera convencional suelen tener un paso de eslabón de 0.135m que corresponde a tres rodillos por eslabón. En este caso existe un rodillo de cada tres que está unido al peldaño mediante un eje y dos que no, como se muestra en la siguiente figura correspondiente a un modelo cinemático realizado en CATIA.

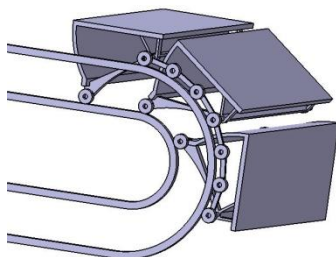


Figura 9 Modelo Cinemático con tres Eslabones por Peldaño

Si variamos el paso del eslabón y analizamos la reacción que recibe el rodillo y la tensión de la cadena para tres pasos distintos de eslabón manteniendo un radio de curvatura constante, se obtienen las gráficas mostradas en la siguiente figura, dónde se observa la clara disminución de los valores de reacción y de la amplitud de tensión al disminuir el paso de 0.405m a 0.135m.

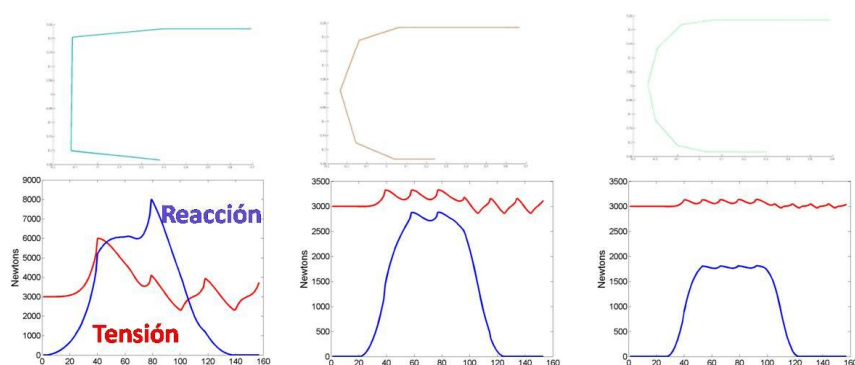


Figura 10 Tensiones y Reacciones para tres Pasos de Eslabón

Estas diferencias se deben principalmente a la variación de la relación existente entre el arco recorrido y la cuerda que define cada eslabón en esa curva. Esta relación puede expresarse matemáticamente de la siguiente forma:

$$Cuerda / arco = \frac{L}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \rho \cdot d\theta} \quad \text{si } \rho \text{ es cte. se tiene que,}$$

$$C/a = \frac{L}{R \cdot \left(2 \cdot \arcsen\left(\frac{L}{2R}\right) \right)} \quad \text{en este caso } R = 0.405 / \sqrt{3} \text{ metros}$$

Ecuación 1 Relación Cuerda/arco

En la anterior ecuación se observa que esta relación, para un radio R constante de la trayectoria de los centros de los rodillos, que la relación *cuerda/arco* depende del paso del eslabón, L y del valor de ese radio constante. Para valores muy pequeños del cociente L/2R, se tiene que esta relación tiende a uno. En la siguiente tabla se recogen los resultados de la simulación de un modelo estático programado en MATLAB. En esta tabla puede apreciarse la disminución de los valores máximos y medios de la reacción y la tensión a medida que la relación *cuerda/arco* se acerca a uno.

Paso	Rodillos por Peldaño	Relación Cuerda/arco	Reacción Máxima	Reacción Media	Tensión Máxima	Tensión Media
0,405	1	0,82699334	8018,48	2983,16	6000,27	3584,23
0,2025	2	0,96690794	2886,08	1218,65	3333,11	3091,53
0,135	3	0,98576835	1815,36	798,11	3141,73	3044,17

Tabla 1 Análisis de la Reacción y Tensión estáticas en función de la relación cuerda/arco

Esta variación del paso del eslabón afecta también a la velocidad relativa entre peldaños y a su distancia mínima a lo largo de la guía. Este efecto se ha analizado simulando cinemáticamente en CATIA un modelo para cada paso de eslabón.



Figura 11 Velocidad Relativa Máxima entre dos Peldaños consecutivos para tres Pasos de Eslabón

Como muestra la Ecuación 1 la relación *cuerda/arco* también puede variarse variando el radio de la curva, si mantenemos el paso del eslabón constante. En la Figura 12 representa el valor máximo de reacción de un rodillo a su paso por una zona de volteo de radio constante, cuyos valores de radio primitivo varían entre 0.203 m y 0.286 m. El paso de eslabón usado es de 0.405m. El eje de abscisas corresponde al valor de la relación *cuerda/arco* definida anteriormente.

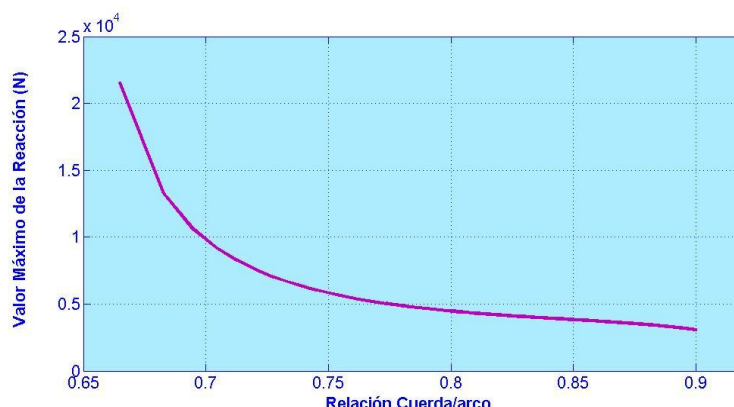


Figura 12 Variación de la Reacción Máxima del Rodillo en función de la Relación cuerda/arco

En la figura anterior se observa la misma tendencia que al variar el paso del eslabón, es decir, que al tender a uno la relación *cuerda/arco* (aumento del radio primitivo de volteo para un paso constante del eslabón de la cadena), el máximo del valor de reacción en la curva estudiada, disminuye.

4. ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE LA ESTACIÓN TENSORA

El tensor de cada cadena tiene tres parámetros característicos, precarga, rigidez y amortiguamiento. Se ha analizado desde un punto de vista estadístico la influencia de estos parámetros en la desviación estándar de la velocidad. Para esto se ha realizado un diseño de experimentos típico de la metodología de Genichi Taguchi: se han definido tres niveles por parámetro, y se han introducido cuatro señales de ruido. Este experimento se ha realizado sobre un modelo de pasillo horizontal de 12 eslabones, simulando en cada una de las 108 simulaciones un tiempo total de 100 segundos. La elección de este modelo se justifica por el menor coste computacional que tiene frente al modelo de guía de 4.5 metros de altura.

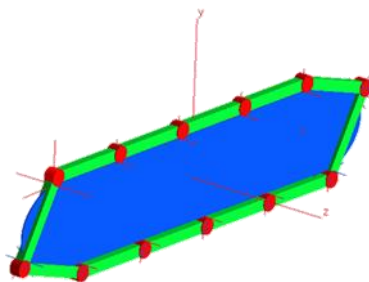


Figura 13 Modelo de Pasillo Horizontal de 12 Eslabones

Sobre los resultados obtenidos, se han aplicado varios análisis estadísticos: relación *señal/ruido* (con el criterio menor es mejor), análisis de la varianza y análisis por regresión múltiple. Los resultados de estos análisis muestran que el parámetro con mayor importancia estadística es la precarga, siguiéndole el amortiguamiento y la rigidez. Las tendencias que minimizan la variación de la desviación típica de la velocidad y dan mayor robustez al sistema son las siguientes:

- Menor Precarga
- Mayor Rigidez y Amortiguamiento

En la Figura 14 se muestran los perfiles de velocidad para la mejor y peor combinación de parámetros del tensor. Se observa la mayor amplitud de la velocidad en el peor caso, en la zona de retorno.

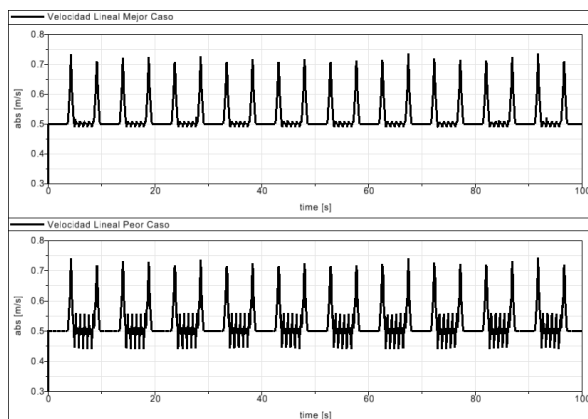


Figura 14 Perfiles Dinámicos de Velocidad en los casos Extremos de Combinación de parámetros del Tensor (Pasillo)

Este resultado se ha inferido en los modelos de cadena de 4.5 metros de altura, comprobando la misma tendencia del perfil de velocidad para las correspondientes combinaciones de parámetros del tensor.

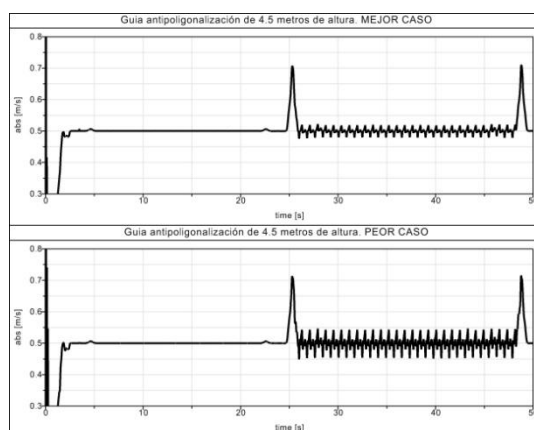


Figura 15 Perfiles Dinámicos de Velocidad en los casos Extremos de Combinación de parámetros del Tensor (Guía de 4.5m de altura)

5. CONCLUSIONES

Las escaleras mecánicas son una instalación fija necesaria y ampliamente utilizada en los transportes suburbanos, lo que justifica la búsqueda de su mejora siguiendo las líneas de ahorro de costes iniciales y de mantenimiento, y aumento del confort del usuario, que a su vez mejorará el grado de satisfacción de los pasajeros de este tipo de transportes.

- Los modelos aquí mostrados muestran líneas de mejora e innovación mediante el empleo de técnicas de simulación avanzadas.
- Existe una gran correlación entre la relación *cuerda/arco* y los valores máximos de reacción y de tensión, acentuándose en las curvas de cabecera.

- El sistema de tracción lineal empleado, combinado con curvas antipoligonalización, asegura una velocidad lineal absoluta constante en la zona accesible a los usuarios con un pequeño aumento de la misma en las zonas de transición.
- El empleo de curvas antipoligonalización disminuye la amplitud de la velocidad lineal absoluta en la zona de retorno, existiendo siempre una oscilación residual debida al efecto dinámico de la estación tensora.
- El tensor tienen una gran influencia en la variación de la velocidad en la zona de retorno, siendo su parámetro más importante la precarga. Una precarga mínima y una rigidez y amortiguamiento máximos son los criterios de diseño robusto obtenidos para el tensor.
- Un diseño que minimice la variación de la velocidad aumentaría la vida de la escalera mecánica, disminuiría los costes de mantenimiento y aumentaría el confort del usuario pues no percibiría el vaivén habitual y encontraría la escalera mecánica menos veces parada.
- La disminución del número de piezas al emplear eslabones de 0.405m frente a los empleados habitualmente de 0.135m, supone un incremento del valor de reacción máxima para una misma geometría de guía, por lo que habría que llegar a una solución de compromiso técnica-económica.
- El empleo de técnicas de simulación para analizar el comportamiento de este sistema mecánico ahorra costes y tiempo respecto a las pruebas experimentales.

CITEF pretende desarrollar modelos más complejos aplicando la metodología desarrollada hasta ahora, y validarlos comparando sus resultados con los obtenidos de la instrumentación de un prototipo real.

6. REFERENCIAS

1. Cabanellas, J.M^a, Cano, J.D., Suárez, B., Chover, J.A., Félez, J. (2008). Mejora de un diseño de más de 100 años. Nuevos conceptos en escaleras mecánicas. Anales de Ingeniería Mecánica, Revista de la Asociación Española de Ingeniería Mecánica, Vol.1, pp. 233-239
 2. Cabanellas, J.M^a, Cano, J.D., Suárez, B., Chover, J.A., Félez, J. (2008). Methods for improving escalators. Elevator Technology 17, Proceedings of ELEVCON 2008 (The International Association of Elevator Engineers), pp. 22-33
 3. Kwon, Y.S. (1998). Dynamic Analysis Step-by-Step. Mechanical Engineering-CIME.
 4. Kwon, Y.S., Scott, G., Park, N. (2005). A Multibody Dynamic Model for Escalator Handrail Systems and its Application to Dynamic Characteristics. Springer, Multibody System Dynamics, Vol. 13, N° 2, pp. 253-266.
 5. Miravete, A., Larrodé, E. (2007). Elevadores: Principios e Innovaciones, Reverté (Ed.), pp.285-389.
 6. Melis, M., González, F.J. (2002). Ferrocarriles Metropolitanos. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Capítulo VI.
-

7. Norma EN 115